

干湿循环对崩岗土体稳定性的影响

刘昌鑫¹, 潘健², 邓羽松¹, 赵媛³, 丁树文¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 湖北省地质调查院, 武汉 430034; 3. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 南宁 530004)

摘要: 通过对湖北通城花岗崩岗区发育典型的各层次土体(淋溶层、淀积层、过渡层、母质层)进行干湿循环试验, 分析干湿交替次数对各层次土体裂隙发育、崩解性、抗剪强度的影响。结果表明, 在干湿循环影响下, 土体产生并逐渐发育裂隙, 在第2次循环后, 土体产生主要裂隙, 裂隙比显著增加, 此后循环发育出细小裂隙。4次循环后4个层次土体的裂隙比表现为淀积层>淋溶层>过渡层>母质层。随着干湿循环次数的增加, 裂隙发育, 各层次土体崩解性不断增强, 淋溶层和淀积层崩解缓慢, 而过渡层和母质层能够在极短时间内完全崩解; 随着干湿循环次数的增加, 土体的抗剪强度不断衰减, 淋溶层和淀积层衰减幅度减小, 过渡层和母质层衰减幅度增大。

关键词: 崩岗; 干湿循环; 土壤裂隙; 崩解性; 抗剪强度

中图分类号: TU443; P642.21; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0253-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.042

The Influence of Wet-dry Cycles on Collapsing Gully Soil Stability

LIU Changxin¹, PAN Jian², DENG Yusong¹, ZHAO Yuan³, DING Shuwen¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2. Hubei Geological Survey Institute, Wuhan 430034; 3. Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530004)

Abstract: This experiment aims at researching the change regulation of soil stability under the condition of wet-dry cycles of all layers of soil in collapsing gully erosion area where granite develops. By conducting the experiment of wet-dry cycles for typical development of all layers of the soil (eluvial horizon, illuvial horizon, cambic horizon and parent material horizon) of granite slope in collapsing gully erosion area in Tongcheng, Hubei province, we analyzed the influence of the times of wet-dry alternations on the development of soil cracks, the disintegration characteristics of soil and the shear strength of soil of all soil layers. The results showed that: Under the influence of wet-dry cycles, the soil developed cracks gradually; after the second cycle, main cracks arised, and the crack ratio increased significantly; after that, cycles developed small cracks. After 4 times of wet-dry cycles, the size of the crack ratio of the 4 layers of soil listed as illuvial horizon> eluvial horizon>cambic horizon>parent material horizon. With the increasing times of wet-dry cycles, soil cracks developed, soil disintegration characteristics of all layers of soil increased constantly, and the disintegration of eluvial horizon and illuvial horizon was slow, while cambic horizon and parent material horizon could completely collapse in a very short time; With the increasing times of wet-dry cycles, the shear strength of soil attenuated constantly, and the amplitude attenuation of eluvial horizon and illuvial horizon decreased, while the amplitude attenuation of cambic horizon and parent material horizon increased.

Keywords: collapsing gully; wet-dry cycles; soil cracks; disintegration characteristics; shear strength

崩岗的发育易受土壤稳定性的影响。学者常从土壤裂隙比、崩解特性和抗剪强度等方面对土体稳定性进行研究。张中彬等^[1]认为裂隙是土壤失水收缩所致, 土壤的收缩幅度决定裂隙的数量, 干湿交替的次数和强度等因素均会影响土壤的收缩和裂隙产生;

周红艺等^[2]对华南花岗岩风化壳土体的裂隙发育进行研究, 发现土体的脱湿容易产生裂隙, 裂隙的发育使得崩壁土体完整性受到破坏, 且崩壁土体不同部位裂隙发育的程度不同, 使得崩壁土体各个方向受力不均而易崩塌; 李思平^[3]认为崩岗取决于崩解特性

收稿日期: 2016-05-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“花岗岩红壤优先流及其与崩岗侵蚀发育的关系”(41571258); 华中农业大学国家级大学生创新创业训练计划项目“花岗岩崩岗不同层次土壤可蚀性与抗冲性对窝形成的影响”(201510504021)

第一作者: 刘昌鑫(1995—), 男, 本科生, 主要从事水土保持研究。E-mail: liuchangxin@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 丁树文(1964—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: dingshuwen@mail.hzau.edu.cn

和土体的松散程度,且水的作用能够影响土体的力学性质;张素等^[4]对干湿交替下土壤崩解性的研究发现,干湿交替对土壤崩解性有一定增强作用,且其增强程度因土质的不同而异;张晓明等^[5]对干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度的衰减进行分析,认为崩岗区岩土由于经历反复干湿循环,造成土壤裂隙迅速发展,使抗剪强度呈不可逆转衰减,促进了崩岗发育。从以上研究可以看出土壤裂隙发育、崩解特性和抗剪强度3个要素受干湿循环影响显著,土体稳定性也必然会因为这3个要素变化而受到影响,进而引起崩岗的发生和发展。

崩岗是发生在我国南方花岗岩地区相当严重的土壤侵蚀现象,主要是山坡土体在水力和重力的共同作用下受破坏之崩塌和冲刷而造成的^[6-8]。崩岗侵蚀泥沙堆积掩埋农田、损毁水利交通设施、淤积江河湖塘,极不利于生态环保可持续发展^[9-10]。我国崩岗发生区主要分布在长江以南的热带和亚热带的热带季风气候区和亚热带季风气候区^[11-13],由于降水丰富,雨旱循环频繁,对土壤裂隙发育、崩解特性、抗剪强度具有明显影响。因此本试验采取干湿循环的方法,选择花岗岩发育的土壤崩壁剖面的4个层次,设置4次干湿循环的模拟试验,观察干湿循环下对土体裂隙比、崩解特性及抗剪强度的变化规律,分析干湿循环

对土体稳定性影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖北省通城县位于东经 113°36′—114°4′,北纬 29°2′—29°24′的中纬度地区,属亚热带季风气候,气候温和,降水充足,雨热同期。年均气温 16.2℃,最高气温 39.7℃,最低气温-15.2℃。年均降雨量约为 1 550 mm,主要集中在 6—9 月,无霜期为 258 d 左右。地带性植物为常绿阔叶林。土壤类型主要是由花岗岩发育的红壤,结构松散。通城县是湖北省崩岗分布的典型地区,共有崩岗 1 102 个,是湖北省全部 9 个崩岗分布县中崩岗数量最多、分布最集中的县,也是全国崩岗防治重点县。

1.2 分层与采样

选取通城县五里镇具有南方花岗岩崩岗典型特征的五里崩岗(113°46′28″E,29°19′55″N)为研究对象,进行重复试验。

根据崩岗侵蚀剖面的颜色、质地划分为 4 个层次,分别为淋溶层、淀积层、过渡层和母质层,并采集 4 个层次的原状土和散土。原状土用 100 cm³ 环刀取样,每个层次采集 2 个原状土样测定含水量,密封以防水分蒸发。散土样采取多点采样混合的方法进行采样。土壤各层基本性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质

剖面层次	土层 深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤总 孔隙度/%	饱和 含水量/%	土壤颗粒组成/%		
					砂粒 (0.05~2 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
淋溶层	0—36	1.28	51.7	40.39	36.28	33.14	30.58
淀积层	36—110	1.39	47.55	34.21	38.31	20.96	40.73
过渡层	110—310	1.37	49.43	36.89	46.86	23.86	29.28
母质层	>310	1.21	54.34	44.91	77.26	19.06	3.68

1.3 试验方法

将 4 层散土土样分别均匀混合后,风干、碾碎过 5 mm 筛,对土样进行加湿处理使其含水量达到原状土饱和度为 50%时的含水量,作为初始含水量。按照原状土干密度将土填入 22.5 cm×15.5 cm 的硬质塑料盒内,盒子底部均匀打孔并铺上滤纸,作为重塑土样品,每个层次做 5 个重塑土样,分别做 0~4 次干湿循环。将重塑土样放入烘箱 40℃烘至恒重,然后用水充分浸泡 48 h,使其含水量达到饱和,再在 40℃烘至原重,此过程为 1 次干湿循环的完成,重复 4 次干湿交替。在 0~4 次交替中,每次交替完成后,取 1 个重塑土样,打入 5 个直剪环刀,1 个用于测定崩解特性,4 个用于直剪试验测定抗剪强度,另用小铝盒取 1 块土体测含水量,以保证土样含水量与设计含水量的差值<1 g。每次循环结束后对每个层次重复 5

次循环的重塑土样用佳能 30D 相机进行拍照,并用 Image J 分析其裂隙发育状况。

1.3.1 基本参数的测定方法 容重、孔隙度采用烘干(105℃)称重法测得;土壤颗粒组成采用吸管法测定。

1.3.2 裂隙分析方法 采用 Image J 软件进行裂隙比的测定。照片经 Image J 处理后对干湿循环下土体裂隙的状况和裂隙比进行测定和计算。具体操作为:先将照片导入软件,对照片进行前期处理使之转化为 8 位灰度图像,对图像进行二值化,然后对二值化后的图像进行颗粒分析,测定裂隙所占比例,最后输出测定的数据。

1.3.3 土体崩解特性的测定方法 对土壤崩解特性采用定量法对崩解量进行测定。按照试验的目的和原理设计崩解试验设备。主要有:玻璃水槽:25 cm×25 cm×80 cm;浮筒:量程 250 ml 最小刻度 2 ml 的

量筒;网格板:10 cm×10 cm,孔径 1 cm² 的金属方格网。通过细丝与量筒底部相连。

将土样放置在网格板中央,然后迅速把浮筒悬浮于水槽。记录浮筒刻度与水面齐平的瞬时稳定度数并记时。记录崩解过程中每个时间段对应的齐水面刻度的瞬间稳定读数。最后记录土样完全崩解落下时(即刻度不再变化)的历时和齐水面刻度读数,试验结束。

运用张抒^[14]修正的崩解量计算公式:

$$A_t = \frac{R_0 - R_t}{R_0 - R_g} \times 100\%$$

(1)

式中: A_t 为试样在时间 t 时的崩解率(%); R_0 为试验开始时浮筒刻度与水面齐平的瞬时稳定读数(cm); R_t 为在时间 t 时浮筒刻度齐水面处的读数(cm); R_g 为完全崩解后浮筒刻度齐水面处的读数(cm)。

由公式(1)得到各层次土样在不同干湿循环次数下的崩解量,并绘制不同干湿循环次数下的崩解量折线图。

1.3.4 土体抗剪强度测定方法 使用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪,根据土工试验方法标准 GB/T 50123—1999 对重塑土样进行快剪试验,测定其抗剪强度。用保鲜膜将透水石包严,以防水分在剪切过程中流失。根据库仑定律计算抗剪强度系数:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

(2)

式中: τ 为土体抗剪强度(kPa); c 为黏聚力(kPa); σ 为作用在剪切面上的法向应力(kPa); φ 为内摩擦角(°)。

根据库仑定律,抗剪强度与 2 个抗剪强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 有关,且与剪切面上的法向应力成正相关,故只需测出参数 c 和 φ 即可。

2 结果与分析

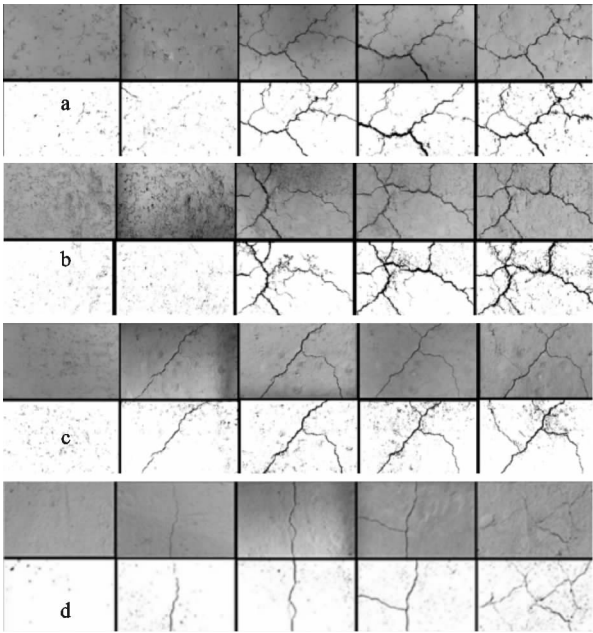
2.1 干湿循环对崩岗各层次土体裂隙发育的影响

裂隙的形成对崩岗的发生有一定影响。干湿循环是土壤水分饱和与完全失水的交替过程,引起土体胀缩产生裂隙^[15]。当裂隙扩展到一定程度时,土体强度会急剧下降^[16],从而引起崩岗的发生和发育。而干湿循环过程中的失水过程会导致裂隙的迅速扩大,促成裂隙的发育^[17-19]。

从图 1 可以看出,随干湿循环次数增加,崩岗各层土体重塑土样的裂隙均不断扩大。淋溶层、淀积层和过渡层在经过 2 次干湿循环后裂隙的发育接近完全,干湿循环后裂隙的发育表现在主裂隙的扩大、加深和周围细小裂隙的出现和发育;母质层裂隙发育则表现为不断变形,较为特殊。

从表 2 可以看出,淋溶层的裂隙发育在第 1 次循环后表现不明显,而在第 2 次循环后出现主要裂隙,并且裂隙比由第 1 次循环后的 1.41%增长到 4.13%;淀积层

与淋溶层类似,在第 2 次循环后产生主要裂隙,且裂隙比增加更加明显,由 1.38%增加到 5.90%;过渡层在第 1 次循环后就产生明显裂隙,第 2 次循环后裂隙比明显增加,在接下来的循环中的裂隙发育也主要围绕这些裂隙发展;母质层的裂隙发育比较特殊,在第 1 次循环产生明显裂隙后,裂隙发育和前 3 个层次相似,但每次循环后裂隙均发生明显的形变,第 4 次循环后土体变得松散且破碎。由表 1 可知,母质层黏粒含量极少,孔隙度大,导致土体黏聚力极小,在循环过程中,重塑土在浸泡饱和时,水将孔隙填满,空气排出,产生明显的垂直方向的胀缩,导致土体结构更加疏松,风干过程使得土体更加脆弱而支离破碎。



注:图 a、b、c、d 分别为淋溶层、淀积层、过渡层、母质层土体在干湿循环下的裂隙状况;从左到右依次为经过 0、1、2、3、4 次干湿循环后的裂隙发育状况;第 1 排为实拍照片;第 2 排为经过 Image J 处理的图像。

图 1 崩岗剖面土层在干湿循环下的裂隙状况

表 2 土壤干湿循环下的裂隙比					%
干湿循环次数	0	1	2	3	4
淋溶层	0.87	1.41	4.13	6.07	7.56
淀积层	0.96	1.38	5.90	7.56	9.78
过渡层	1.26	2.43	4.33	4.86	5.34
母质层	0.24	0.96	1.27	1.75	3.39

2.2 干湿循环对崩岗各层次土体崩解特性的影响

图 2 为淋溶层重塑土样在不同干湿循环次数下崩解量的变化过程。崩岗淋溶层重塑土样的崩解量受干湿循环影响较为明显。土体的崩解量从 0 次到 4 次循环依次增大,0~50 min 崩解量增长较快,50 min 后增长缓慢。在 0 次循环土体的崩解量很小且随时间变化平缓,而第 1 次干湿循环过后崩解总量由 0 次的 13.63%迅速增加到 52.27%。1~3 次循环后崩解量都有增加但增幅均匀,趋于平缓。经历干湿循

环的表层土样崩解量比未经干湿循环的土样崩解量增加显著,这是由于重塑土样本结构不稳固,经历干湿循环后土体裂隙不断发育,结构被不断破坏,趋于崩解。

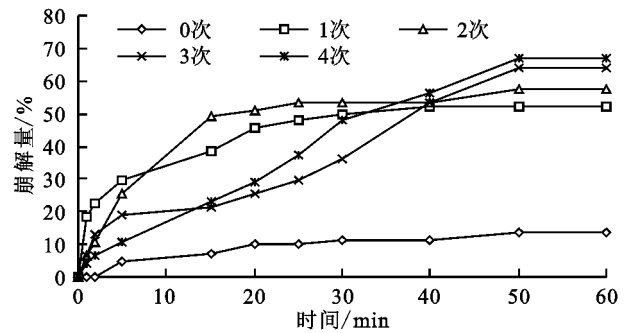


图 2 淋溶层土壤在不同干湿循环次数下的崩解量

图 3 为淀积层重塑土样在不同干湿循环次数下的崩解量的变化过程。由于土壤的崩解特性与其土体结构的理化性质密切相关^[20]。由表 1 可知,淀积层中由于黏粒含量高,持水性强,因而结构紧密,崩解性弱。淀积层重塑土样在经过 0 次干湿交替后的崩解试验进行到 15 min 时发生重塑土样的完全崩解(图 3)。原因可能是在重塑之后,土体的结构遭到破坏,且在含水量较低的情况下土体并未达到结构稳定,入水即散。而在经过 1 次干湿循环下土体趋于稳定,崩解量小且速度缓慢,60 min 后崩解量为 11.36%。经历多次干湿交替,土体中的黏粒不断流失,裂隙不断发育扩大,崩解量也逐次增加,在第 4 次循环后崩解量达到 30.00%,崩解量增幅基本一致。可以发现土体的稳定性在干湿循环过程中形成基本等量的衰减过程,衰减的结果是旧土体完全剥落,新土体露出,重新经历干湿循环。在崩岗侵蚀中表现为土体不断剥落,沟头不断前进,引发崩岗。

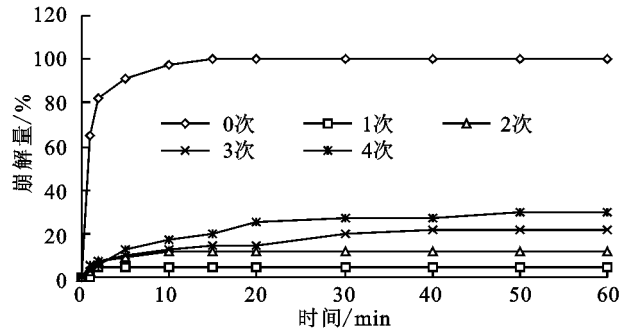


图 3 淀积层土壤在不同干湿循环次数下的崩解量

图 4 为过渡层重塑土样在不同干湿循环次数下的崩解量的变化过程。由表 1 可知,过渡层含黏粒极少,结构较为松散,浸水后在短时间内迅速崩解,最终能够达到完全崩解。0 次至 3 次干湿循环下重塑土样的崩解量随次数的增加而减小,达到完全崩解所需的时间极短,依次为 40, 60, 120, 120 s,而第 4 次循环下完全崩解时间减小到 90 s,第 3 次干湿循环成为土

体完全崩解所需时间的转折点。这是由于不断浸水与风干交替过程使重塑土样的土体颗粒不断分离并重新排列,其结构也不断经历松散与紧密交替,但随交替次数增加,土体稳定性不断减小,加上过渡层中黏粒含量少,土体结构依然趋于松散,最终导致土体完全崩解^[21]。

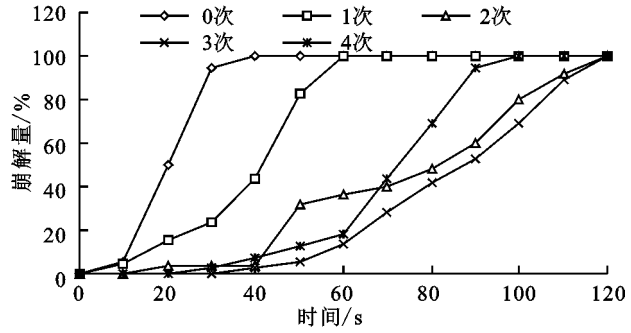


图 4 过渡层土壤在不同干湿循环次数下的崩解量

图 5 为母质层重塑土样在不同干湿循环次数下崩解量的变化过程。母质层在不同循环次数下崩解性的变化与过渡层相似,崩解速率随循环次数的增加先减小后增加,第 3 次循环为转折点,0~4 次循环下在 100~180 s 内均能够完全崩解。母质层的黏粒含量几乎为零,孔隙多,整个土体没有黏聚力,在自然状态下呈松散状态堆积。由于孔隙发达,每次的浸水都会填满孔隙,使土体发生膨胀,经过风干孔隙变大,形成更加松散的结构,进而在重力作用下发生塌陷和破碎。

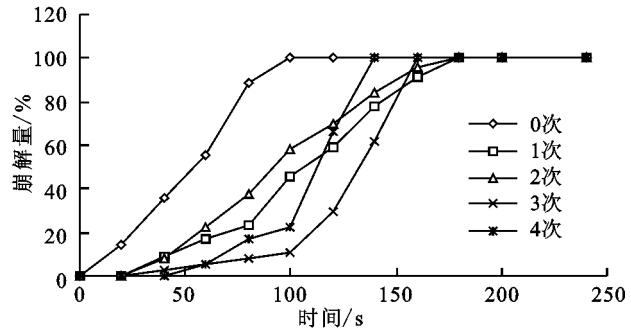


图 5 母质层土壤在不同干湿循环次数下的崩解量

2.3 干湿循环对崩岗各层次土体抗剪强度的影响

2.3.1 干湿循环对淋溶层和淀积层抗剪强度的影响 图 6 为淋溶层和淀积层重塑土样在不同干湿循环次数下抗剪强度及其指标的变化过程,表现了重塑土样在不同程度的法向应力和干湿交替次数下抗剪强度的变化。而抗剪强度的大小由内摩擦角和黏聚力共同控制^[22-23]。从图 6 可以看出,淋溶层重塑土样在 0 次干湿循环后的抗剪强度较小,除淋溶层的 0 次循环外,其余循环过程后的抗剪强度都表现为随着干湿循环次数的增加而减小,从第 1 次到第 2 次循环中抗剪强度的衰减幅度较大,3~4 次循环中的减幅逐渐减小。内摩擦角和黏聚力这两个指标也都随着循环次数的增加而减小,且黏聚力下降的幅度更大(表 3)。

淀积层重塑土样的抗剪强度在干湿循环下的变化规律与淋溶层相似,两者在 0 次循环时的抗剪强度较小,在 1~4 次循环中则均表现为随干湿循环次数的增加,抗剪强度逐渐减小。且随着循环次数增加,

内摩擦角和黏聚力都呈下降趋势(表 3)。第 2 次循环后的抗剪强度与第 0,1 次相比减幅较大。在第 2~4 次干湿循环下,淀积层抗剪强度的衰减缓慢,总体来看减幅呈减小趋势,与崩解性规律较为吻合。

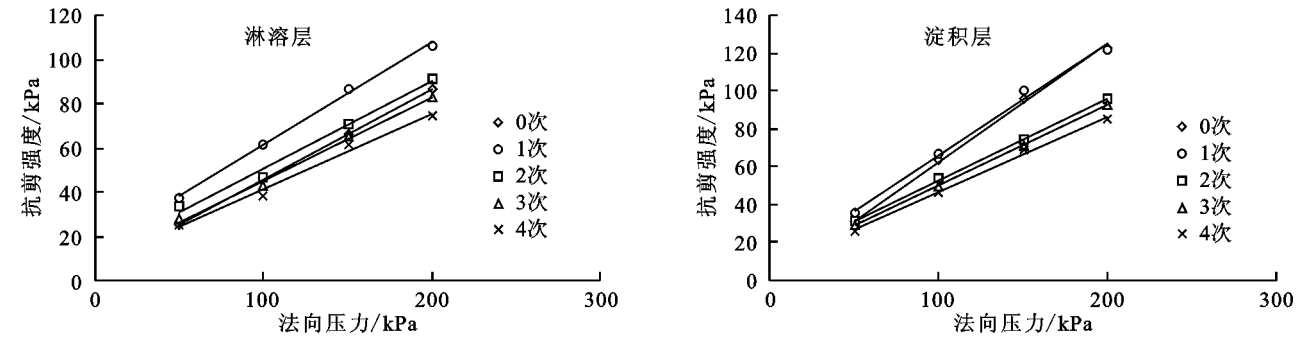


图 6 淋溶层和淀积层土壤在不同干湿循环次数下的剪切曲线

2.3.2 干湿循环对过渡层和母质层抗剪强度的影响 图 7 为过渡层和母质层重塑土样在不同干湿循环次数下抗剪强度及其指标的变化规律。过渡层重塑土样在干湿循环下抗剪强度的衰减主要表现在内摩擦角不断减小(表 3),且从剪切曲线可以看出,除 0 次循环外,随着循环次数增加,抗剪强度和内摩擦角的减幅均不断增加。因此过渡层的重塑土样随着干湿循环交替,抗剪强度衰减越来越大。过渡层抗剪强

度的这一特性使土体更容易发生崩岗。母质层黏粒含量几乎为零,质地松散,没有黏聚力,因此抗剪强度只受内摩擦角的影响(表 3),所以母质层重塑土样的抗剪强度受干湿循环的影响较小,其在干湿循环下的抗剪强度衰减规律与过渡层类似,衰减幅度呈增大趋势。随着抗剪强度的衰减,土体的荷载能力相应减小,最终导致崩壁失去稳定性,引起侵蚀的进一步发生。

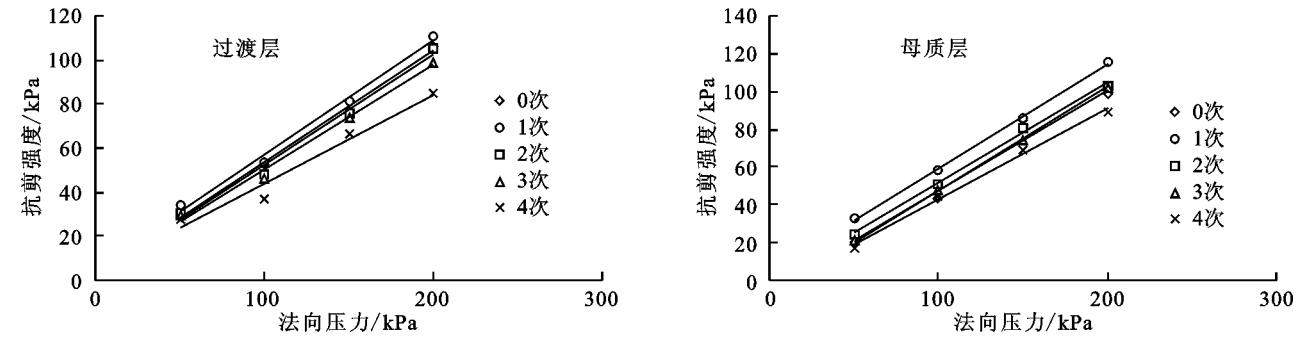


图 7 过渡层和母质层土壤在不同干湿循环次数下的剪切曲线

表 3 土壤干湿循环下的内摩擦角和黏聚力

循环 次数(次)	淋溶层		淀积层		过渡层		母质层	
	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
0	24.9	4.62	40.9	0.77	31.3	3.85	35.1	0
1	28.4	14.64	38.4	7.71	32.8	5.39	35.1	3.85
2	23.5	11.56	26.3	10.02	31.3	2.31	33.6	0
3	22.9	7.71	25.6	7.71	29.1	3.08	33.6	0
4	20.3	6.93	24.2	6.93	24.2	3.85	29.8	0

2.4 干湿循环条件下土体裂隙、崩解特性和抗剪强度之间的关系

干湿循环对崩岗土体的稳定性产生显著影响。干湿循环过程中,土体逐渐产生、发育裂隙^[24]。淋溶层和淀积层的主要裂隙在 2 次干湿循环后完成,过渡层和母质层的主要裂隙在第 1 次循环后初步形成并在 2 次循环后完成,此后稳定发育,裂隙比不断增大。淋溶层、淀积层、过渡层由第 1 次到第 2 次循环的裂隙比变化为 1.41%~4.13%,1.38%~5.90%,2.43%~

4.33%,母质层较为特殊,变化稳定。崩解性的变化与裂隙比一致,随干湿循环,崩解量呈增大趋势。而抗剪强度的变化,各层次抗剪强度在第 1 次干湿交替后增加,随后随着循环次数增加而衰减。淋溶层、淀积层的衰减幅度减小;而对于过渡层和母质层而言,抗剪强度依然随循环减小,但衰减幅度随干湿循环的次数增加而不断加大,且主要表现在内摩擦角的减小上。抗剪强度这一衰减特点与裂隙比的增加趋势基本吻合。裂隙比和崩解量的变化趋势均为随着干湿

交替而不断增大,抗剪强度随着干湿交替而不断减小。可见,崩岗剖面土体的裂隙比、崩解特性和抗剪强度在干湿循环的进行下,朝着恶劣的方向发展,使土体的稳定程度减弱。在崩岗侵蚀区,随着干湿交替,裂隙比、崩解特性和抗剪强度三者的变化规律成为促进崩岗发生的因素。

3 结论

(1)随着干湿循环次数的增加,各层次的裂隙比不断增加。淋溶层、淀积层在第 2 次循环后主要裂隙发育完成,裂隙比显著增加,第 3,4 次循环后裂隙比增量减少且趋于稳定;过渡层和母质层在第 1 次循环后产生主要裂隙,裂隙比陡增。母质层循环后裂隙发育较不规则,垂直方向上的胀缩明显。循环次数达到 4 次后,裂隙比表现为淀积层>淋溶层>过渡层>母质层。不断发育的裂隙使得土体的稳定性不断下降。

(2)在不同干湿循环次数下,4 个层次土体的崩解速率表现为过渡层>母质层>淋溶层>淀积层,且过渡层和母质层崩解极其迅速。相同时间内,随着干湿循环次数的增加,淋溶层和淀积层的崩解量逐渐增加;过渡层和母质层在短时间内完全崩解,第 3 次循环为崩解速率先减小后增加变化的转折点,这是多次干湿循环过程中,重塑土趋于紧密后在水的作用下变松散的结果。

(3)4 个层次土体的抗剪强度均随干湿循环次数增加而减小。淋溶层和淀积层的衰减幅度不断减小,而过渡层和母质层的衰减幅度逐渐增加。表明随干湿循环的进行,崩壁剖面土体稳定性不断下降,尤其是过渡层和母质层,更易失去稳定性。

(4)从总体上看,崩岗剖面土体的裂隙、崩解特性、抗剪强度 3 个影响因素在经历干湿循环后的变化趋势均表现为随着循环次数的增加而增加,且关联紧密,一起成为崩岗发生和发展的影响因素。

参考文献:

- [1] 张中彬,彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土壤学报,2015,52(3):477-488.
- [2] 周红艺,李辉霞,叶奇,等. 华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):338-342.
- [3] 李思平. 广东崩岗形成的岩土本质[J]. 亚热带水土保持,1991(4):28-33.
- [4] 张素,郑学用,熊东红,等. 干湿交替对干热河谷冲沟发育区不同土壤崩解性的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):111-121.
- [5] 张晓明,丁树文,蔡崇法. 干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J]. 农业工程学报,2012,28(5):241-245.
- [6] 王礼先,孙保平,余新晓,等. 中国水利百科全书:水土保持分册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:48-49.
- [7] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [8] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等. 鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟[J]. 土壤学报,2016,53(2):355-364.
- [9] Deng Y S, Xia D, Cai C F, et al. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(8):1863-1873.
- [10] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等. 鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征[J]. 中国农业科学,2014,48(12):4850-4857.
- [11] 李双喜,桂慧中,丁树文. 中国南方崩岗空间分布特征[J]. 华中农业大学学报,2013,32(1):83-86.
- [12] 邓羽松,丁树文,刘辰明,等. 鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报,2015,29(4):132-137.
- [13] 牛德奎,郭晓敏,左长清,等. 我国南方红壤丘陵区崩岗侵蚀的分布及其环境背景分析[J]. 江西农业大学学报,2000,22(2):204-206.
- [14] 张抒. 广州地区花岗岩残积土崩解特性研究[D]. 武汉:中国地质大学,2009.
- [15] 唐朝生,施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报,2011,33(9):1376-1384.
- [16] Tang Y, Li J, Zhang X, et al. Fractal characteristics and stability of soil aggregates in karst rocky desertification areas[J]. Natural Hazards, 2012, 65(1):563-579.
- [17] 袁俊平. 非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究[D]. 南京:河海大学,2003.
- [18] 张家俊,龚壁卫,胡波,等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(9):2729-2734.
- [19] Tang C S, Shi B, Liu C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. Engineering Geology, 2008, 101(3/4):204-217.
- [20] 王幼麟,蒋顺清. 葛洲坝工程某些粉砂岩软化和崩解的微观特性[J]. 岩石力学与工程学报,1990,9(1):48-57.
- [21] 吴道祥,刘宏杰,王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊 2):4173-4179.
- [22] 杨和平,王兴正,肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报,2014,36(5):949-954.
- [23] 倪九派,高明,魏朝富,等. 干湿循环条件下重庆地区三种土壤抗剪强度的动态变化[J]. 土壤学报,2013,50(6):1090-1101.
- [24] 卢再华,陈正汉. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究[J]. 岩土力学,2002,23(4):417-422.